DOI:10.11776/j.issn.1000-4939.2025.01.011

沙漠砂蒸压砖制备工艺及强度机理研究

王姗[1],吴楠[2],屠兴福[1],王玉山[1,3],王锐[4],周阳[1]

(1.石河子大学水利建筑工程学院,832000 石河子;2.浙江工业大学工程设计集团,310014 杭州;
3.石河子大学寒区城镇化建设与新技术重点实验室,832000 石河子;4.石河子大学理学院,832000 石河子)

摘　要:为了得到性能优异,经济效益好的沙漠砂蒸压砖,通过改变成型压力、蒸压时间、蒸压温度对沙漠砂蒸压砖力学性能、水化及微观结构特性进行研究,为优化沙漠砂蒸压砖制备工艺提供技术支持及理论依据。研究表明:MU15 级沙漠砂蒸压砖适宜的制备工艺为成型压力 20 MPa、蒸压时间 8 h、蒸压温度 180 ℃;通过扫描电子显微镜观察到,合适的成型压力、蒸压时间、蒸压温度会促进沙漠砂蒸压砖内部物理化学反应,使水化产物 C-S-H 快速形成网状连锁结构,提高砖体力学性能;通过 X 射线衍射对硬化的蒸压砖试块相组成进行了测试,结果显示过高的温度和过长蒸压时间会使主要提供强度的水化产物 C-S-H 转变为水钙沸石,不利于强度增长。

关键词:沙漠砂蒸压砖;制备工艺;力学性能;水化;微观结构

中图分类号:TU312;TU528.2　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-4939(2025)01-0109-08

Study on the preparation technology and strength mechanism of desert sand autoclaved brick

WANG Shan[1],WU Nan[2],TU Xingfu[1],WANG Yushan[1,3],WANG Rui[4],ZHOU Yang[1]

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering,Shihezi University,832000 Shihezi,China;
2. Zhejiang University of Technology Engineering Design Group,310014 Hangzhou,China;
3. Key Laboratory of Urbanization Construction and New Technology in Cold Regions,Shihezi University,
832000 Shihezi,China;4. College of Sciences,Shihezi University,832000 Shihezi,China)

Abstract:In order to obtain desert sand autoclaved brick with excellent performance and good economic benefit,in this paper,the mechanical properties,hydration and microstructure of desert sand autoclaved brick were studied by changing forming pressure,autoclaved time and autoclaved temperature. It provides technical support and theoretical basis for optimizing the preparation process of desert sand autoclaved brick. Research shows that the suitable preparation technology of MU15 desert sand autoclaved brick is forming pressure 20 MPa,autoclaved time 8 h,autoclaved temperature 180 ℃. It can be observed from the scanning electron microscope that the proper forming pressure,autoclaved time and autoclaved temperature will promote the physical and chemical reaction inside the desert sand autoclaved brick,which enables the

收稿日期:2022-07-05
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.51468058);兵团科技创新人才计划项目(No.2022CB008);大学生研究训练计划(SRP)项目(No.SRP2022161)
通信作者:王玉山,教授。E-mail:wysbgxn@shzu.edu.cn
引用格式:王姗,吴楠,屠兴福,等.沙漠砂蒸压砖制备工艺及强度机理研究[J].应用力学学报,2025,42(1):109-116.
WANG Shan,WU Nan,TU Xingfu,et al. Study on the preparation technology and strength mechanism of desert sand autoclaved brick[J]. Chinese journal of applied mechanics,2025,42(1):109-116.

hydration product C-S-H to quickly form a network chain structure and improve the mechanical properties of brick. The phase composition of the hardened desert sand steam pressing brick was measured by X-ray diffraction. The results show that the hydration product C-S-H which provides the main strength can be transformed into calcium zeolite at too high temperature and too long autoclaved time, which is not beneficial to the strength growth.

Key words: desert sand autoclaved brick; preparation technology; mechanical property; hydration; microstructure

由于我国新型城镇化及全国“城市限粘、县城禁实”等工作的开展,大力推出符合当地建筑结构所需且可替代粘土砖的新型墙体材料已成为不可避免的趋势。蒸压砖是由部分冶金废渣、燃料废渣、化工废渣、建筑垃圾等作为主要原料,采用压制成型、蒸压养护的方法制备的一种新型墙体材料[1-3]。目前国内所做的研究大都集中于建筑垃圾、粉煤灰和矿渣蒸压砖[4-9],但由于建筑垃圾再利用处理过程繁琐,粉煤灰价格逐渐升高等原因,寻求一种新的原材料制备蒸压砖成为新的趋势。新疆地广人稀,且有着塔克拉玛干和古尔班通古特 2 个沙漠[10-11],沙漠不仅造成土地退化、土壤结构破坏,还会破坏基础设施。其中一些学者将沙漠砂应用到混凝土的拌制中,但是由于沙漠砂具有粒径小、吸水率高、轻微腐蚀性等特性,导致纯沙漠砂混凝土抗压强度降低、坍落度偏低[12-13],这对沙漠砂混凝土用于新疆偏远地区农村团场的房屋修建并不占优势。本研究遵循“因地制宜、就地取材、节能利废”的原则,利用沙漠砂研发了一种蒸压砖,作为村镇建筑中粘土砖与沙漠砂混凝土的替代品。

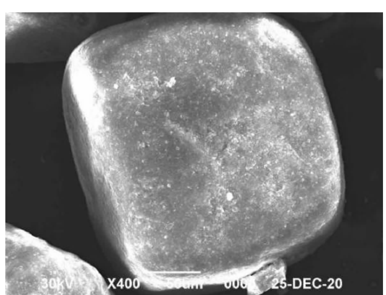
沙漠砂用于制备沙漠砂蒸压砖的相关研究较少,且沙漠砂主要化学成分与粉煤灰相似,因此为了得到性能优异、经济效益好的沙漠砂蒸压砖,本研究在借鉴粉煤灰蒸压砖配合比的基础上通过改变成型工艺及蒸压制度对沙漠砂蒸压砖进行了力学性能、水化及微观结构方面的研究,为制备 MU15 等级的沙漠砂蒸压砖提供技术支持及理论依据。

1 沙漠砂蒸压砖的原料及配比

沙漠砂蒸压砖以沙漠砂、生石灰、骨料和水为原材料。沙漠砂于新疆生产建设兵团第五师 83 团沙山子镇获取,沙漠砂成分构成如表 1 所示。

骨料取自混合砂石料,粒度在 0.5 cm 以下;生石灰符合《硅酸盐建筑制品用生石灰》(JC/T 621—2009)[14]的要求;蒸压砖力学性能随着石灰掺量增加而增加,但石灰掺量到一定比例后,制备而成的产品强度会随着石灰含量的增加而降低,所以本研究配合比及制备流程参照粉煤灰砖的制备过程,石灰、骨料、粉煤灰的比例控制在 15∶13∶70[9,14-15]。本研究取石灰 15%、骨料 14.2%、沙漠砂 70.8%。

颗粒粒径及形貌:利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对沙漠砂的形貌进行观察,同时读出沙漠砂的平均粒径,见图 1。由图 1 可见沙漠砂为表面平滑的颗粒状,粒径为 100~300 μm。



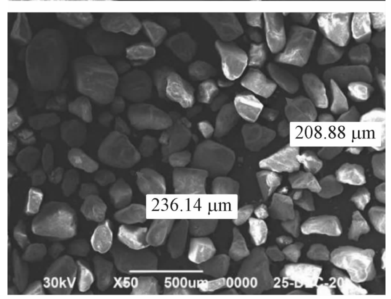


图 1 沙漠砂的 SEM 图

Fig. 1 SEM of desert sand

表 1 沙漠砂成分构成

Tab. 1 Desert sand composition

成分	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	CaO	K_2O	Fe_2O_3	MgO	其他
含量/%	67.10	17.90	4.94	4.22	3.48	1.35	0.83	0.18

2　沙漠砂蒸压砖制备工艺的试验研究

2.1　成型压力对沙漠砂蒸压砖强度影响的研究

蒸压砖能够通过提升成型压力来达到增加物料相互之间接触点数的目的,进而实现蒸压砖强度的提高,但是过高的成型压力会导致砖体内空气排除不完全,引起砖体膨胀不利于产品质量保证,本节参考文献[5-7]探究了不同成型压力对沙漠砂蒸压砖力学性能的影响。试验方案见表 2,A1 ~ A4 研究不同成型压力下的沙漠砂蒸压砖的力学性能,每组取 5 块试件参照《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)[16]进行抗压试验,试验结果取平均值,见图 2。

表 2　成型压力试验方案

Tab. 2　Formation pressure test scheme

组别	沙漠砂/%	石灰/%	骨料/%	水料比/%	成型压力/MPa	蒸压时间/h	蒸压温度/℃
A1	70.8	15.0	14.2	15.0	16	12	180
A2	70.8	15.0	14.2	15.0	18	12	180
A3	70.8	15.0	14.2	15.0	20	12	180
A4	70.8	15.0	14.2	15.0	22	12	180

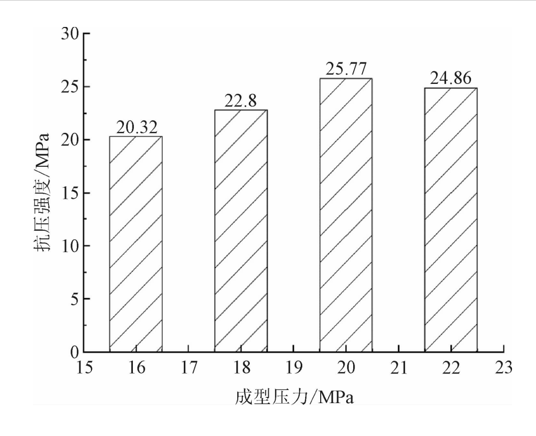


图 2　成型压力对沙漠砂蒸压砖强度的影响

Fig. 2　Effect of forming pressure on strength of desert sandautoclaved brick

由图 2 可知,成型压力大于 16 MPa 的沙漠砂蒸压砖的抗压强度均大于 15 MPa。成型压力小于 20 MPa时,蒸压砖的抗压强度会随着成型压力的增加而提高;成型压力超过 20 MPa 时,沙漠砂蒸压砖的强度开始下降。造成以上这种变化趋势的主要原因是搅拌混合物的过程中会进入很多空气,而成型压力越大砖内气体越不易排出,导致试件内外压力差减小,降低成型压力的作用效果[17],使蒸压砖内部产生分层现象;另一方面,砖内压缩的气体会产生强烈的膨胀作用,对坯体形态造成影响,降低砖体抗压强度。综上所述,成型压力选用 20 MPa,抗压强度为 25.77 MPa。

提升成型压力可以加快沙漠砂蒸压砖物料之间的化学反应,通过 SEM 试验对不同成型压力的沙漠砂蒸压砖的水化产物微观形貌变化情况进行观察,试验结果见图 3。

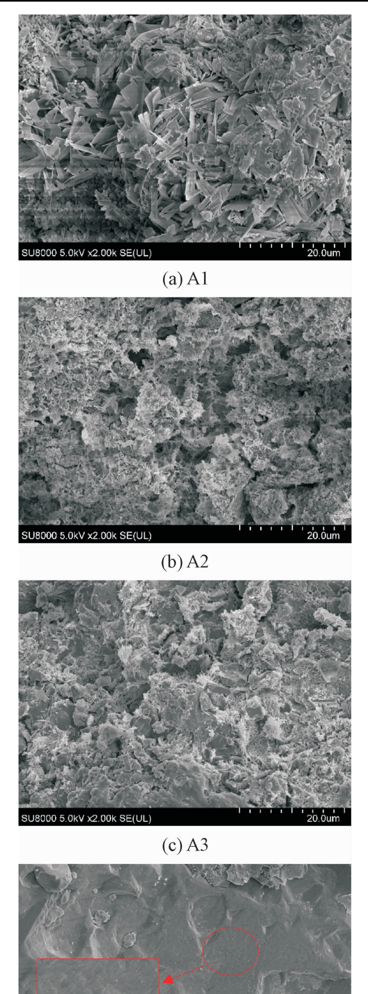


图 3　不同成型压力沙漠砂蒸压砖的 SEM 图

Fig. 3　SEM picture of desert sand autoclaved brick with different forming pressures

由图3可知,不同成型压力下的沙漠砂蒸压砖的微观形貌存在明显区别。当成型压力较小时,沙漠砂蒸压砖内部存在较大的孔隙,内部的水化产物与粗骨料及沙漠砂之间的连接不够紧密,沙漠砂蒸压砖的强度较低;随着成型压力的提高,沙漠砂蒸压砖内部的孔隙逐渐变小,水化产物能够连接起粗骨料及沙漠砂,支撑起沙漠砂蒸压砖的内部结构,沙漠砂蒸压砖的强度逐渐增加;成型压力增加至20 MPa,水化产物形成大量致密的网状结构,水化产物继续发展,与粗骨料及沙漠砂搭接,沙漠砂蒸压砖的强度增加;成型压力继续增加,沙漠砂蒸压砖内部的孔隙被挤压,形貌光滑连成一片,水化产物分布在光滑的形貌之上,没有连接起骨料以及沙漠砂,内部没有形成很好的支撑结构,导致沙漠砂蒸压砖的强度下降。

成型压力决定了拌合物蒸压前的密实程度,对不同成型压力压制的沙漠砂蒸压砖进行X射线衍射(X-ray diffraction,XRD)分析(图4)。由图4可知,不同成型压力下的沙漠砂蒸压砖水化产物的种类不变。成型压力在16~20 MPa范围内,沙漠砂蒸压砖的主要水化产物是托勃莫来石(Tobermorite)、水钙沸石(Gismondine)以及水化硅酸钙(C-S-H),成型压力的变化并未使沙漠砂蒸压砖水化产物衍射峰强度出现明显变化;成型压力增大至22 MPa时,未反应的沙漠砂以及粗骨料的 SiO_2 衍射峰强度减小, 而水钙沸石及C-S-H的衍射峰强度增加。

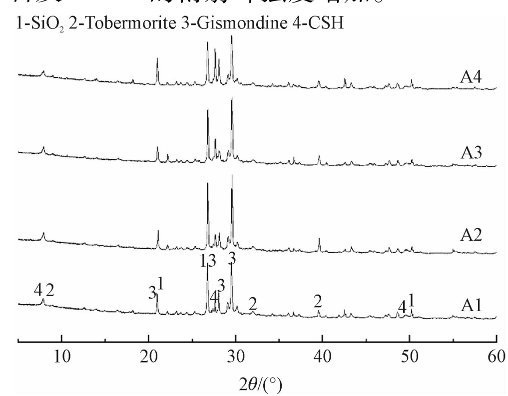


图4 不同成型压力沙漠砂蒸压砖的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of desert sand autoclaved brick with different forming pressure

综上可得,成型压力过大,会提高沙漠砂反应程度,但是会使蒸压砖内部空气排出不完全,砖体内部出现分层现象导致水化产物之间连接不紧密,沙漠砂蒸压砖的抗压强度下降。

2.2 蒸压时间对沙漠砂蒸压砖强度影响的研究

蒸压时间与水化产物的量相关,一定范围内随着蒸压时间的延长,试件力学性能增加,根据前期试验确定的成型压力,本节综合文献[5,15,18]探究不同蒸压时间下制得的沙漠砂蒸压砖的力学性能,试验方案见表3。

表3 蒸压时间试验方案

Tab. 3 Steam pressure time test scheme

组别	沙漠砂/%	石灰/%	骨料/%	水料比/%	成型压力/MPa	蒸压时间/h	蒸压温度/℃
B1	70.8	15.0	14.2	15.0	20	6	180
B2	70.8	15.0	14.2	15.0	20	8	180
B3	70.8	15.0	14.2	15.0	20	10	180
B4	70.8	15.0	14.2	15.0	20	12	180
B5	70.8	15.0	14.2	15.0	20	14	180

B1~B5研究不同蒸压时间下的沙漠砂蒸压砖的力学性能,每组取5块试件参照《砌墙砖试验方法》[16]进行抗压试验,试验结果取平均值,见图5。

由图5可知,蒸压时间大于6 h的沙漠砂蒸压砖的抗压强度均大于15 MPa。沙漠砂蒸压砖的抗压强度随着蒸压时间的增加而不断提高,说明蒸压时间对试件的性能具有重要影响。蒸压砖强度以6 h为基准,蒸压时间从6 h增至8、10、12、14 h,抗压强度分别增加了6.6%、12.2%、21.9%、22.4%,继续延长蒸压时间对抗压强度提升不明显。考虑实际生产容易出现影响强度的不确定因素,为保证沙漠砂蒸压砖的生产质量,综合经济等方面决定,蒸压时间选用8 h,抗压强度为21.47 MPa。

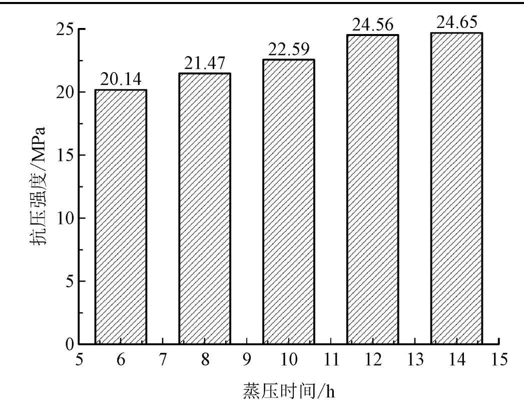
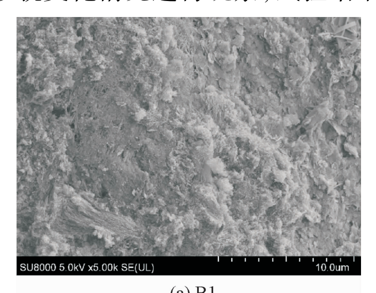


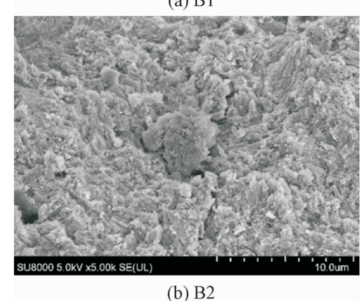
图5 蒸压时间对沙漠砂蒸压砖强度的影响

Fig. 5 Effect of autoclaved time on strength of desert sand autoclaved brick

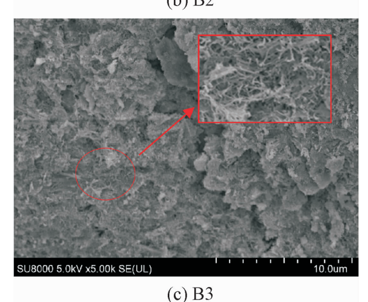
沙漠砂蒸压砖蒸压养护阶段 SiO_2 和 $Ca(OH)_2$ 的溶解、凝胶产物的形成和生长需要一定时间，所以蒸压时间在很大程度上会影响沙漠砂蒸压砖的微观形貌。通过 SEM 试验对不同成型压力的沙漠砂蒸压砖的微观形貌变化情况进行观察，试验结果见图 6。



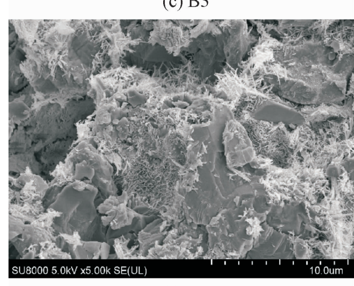
(a) B1



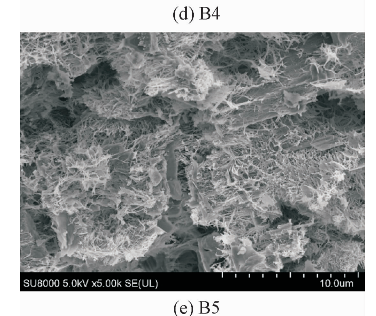
(b) B2



(c) B3



(d) B4



(e) B5

图 6　不同蒸压时间沙漠砂蒸压砖的 SEM 图

Fig. 6　SEM images of desert sand autoclaved brick with different autoclaved time

图 6 可知，沙漠砂蒸压砖从蒸压时间 6 h 增加至 14 h，试件的微观形貌产生明显变化。沙漠砂蒸压砖蒸压 6 h 后已经形成了一些网状结构，这也是沙漠砂蒸压砖蒸压 6 h 后强度满足 15 MPa 的主要原因，但与图 6(b) ~ 图 6(e) 相比，水化产物的数量较少；蒸压时间增至 8 h 时，沙漠砂蒸压砖内部形成了大量互相连锁的网状的结构，纤维状的水化产物 C-S-H将沙漠砂和粗骨料连接在一起，沙漠砂蒸压砖的强度有所提升；蒸压时间增至 12 h 时，C-S-H 将沙漠砂蒸压砖的表面覆盖，填补蒸压砖内部孔隙，强度继续增加；蒸压时间增加至 14 h 时，由于蒸压时间过长，晶胶比超过最佳值[18]，所以蒸压砖强度增长不大，同时也可以由 XRD 水化产物水钙沸石的衍射峰变化得出。

对不同蒸压时间下的沙漠砂蒸压砖进行 XRD 分析，图谱见图 7。

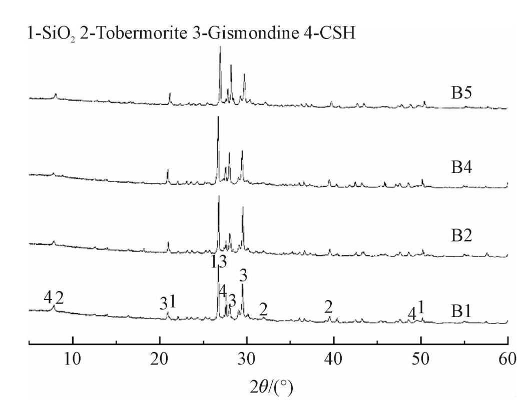


图 7　不同蒸压时间沙漠砂蒸压砖的 XRD 图谱

Fig. 7　XRD patterns of desert sand autoclaved brick with different autoclaved time

由图 7 可知，不同蒸压时间下的沙漠砂蒸压砖水化产物的种类区别不大，沙漠砂蒸压砖的主要水化产物仍旧是托勃莫来石、水钙沸石以及 C-S-H。蒸压时间从 6 h 增加至 12 h，托勃莫来石、水钙沸石的衍射峰增强，C-S-H 的衍射峰强度变化较小，沙漠砂蒸压砖内部能不断地形成网状结构，使得砖体的力学性能提升。蒸压时间从 12 h 增加至 14 h，托勃莫来石、C-S-H 的衍射峰增强度变化较小，证明对蒸压砖强度贡献较大的水化产物托勃莫来石和 C-S-H 的量基本达到平稳状态；水钙沸石的衍射峰增幅明显，说明延长蒸压时间可以促进水钙沸石的生成，这与文献[19]结论相似，原因是四配位 Al[4] 进入 C-S-H 的数量增多，水钙沸石含量增加，C-S-H 凝胶与水钙沸石等晶体比值减小，导致晶胶比超过最佳值，继续增加蒸压时间对力学性能的提升不大。

2.3 蒸压温度对沙漠砂蒸压砖强度影响的研究

蒸压温度的提高一定程度上可以提高 SiO_2 的溶出，而过高的温度会导致水化产物相的转变。因此本节在前述已知最适宜成型压力、蒸压时间的基础上，综合文献[5,19]分析研究不同蒸压温度对沙漠砂蒸压砖力学性能产生的影响，试验方案见表4。C1～C3 研究不同蒸压温度下的沙漠砂蒸压砖的力学性能，每组取5块试件参照《砌墙砖试验方法》[16]进行抗压试验，试验结果取平均值，见图8。

表4 蒸压温度试验方案

Tab.4 Autoclaved temperature test scheme

组别	沙漠砂/%	石灰/%	骨料/%	水料比/%	成型压力/MPa	蒸压时间/h	蒸压温度/℃
C1	70.8	15.0	14.2	15.0	20	8	170
C2	70.8	15.0	14.2	15.0	20	8	180
C3	70.8	15.0	14.2	15.0	20	8	190

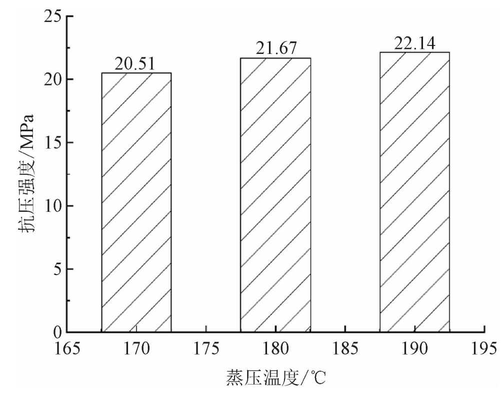


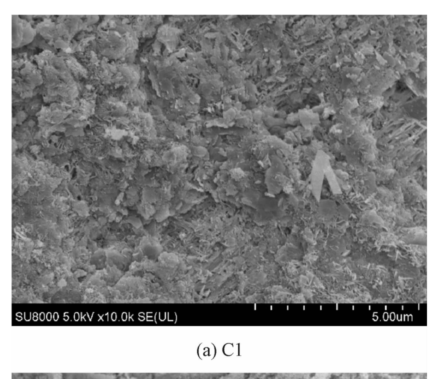
图8 蒸压温度对沙漠砂蒸压砖强度的影响

Fig.8 Effect of autoclaved temperature on strength of desert sand autoclaved brick

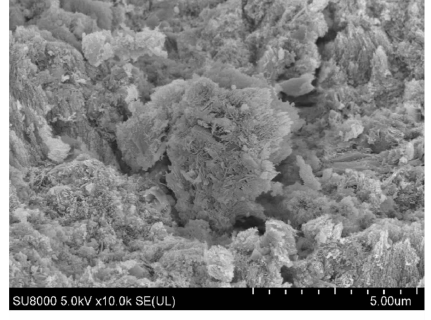
由图8可知，蒸压温度不低于170 ℃时制得的沙漠砂蒸压砖的抗压强度均大于15 MPa，沙漠砂蒸压砖的抗压强度会随着蒸压温度的提高而增加。以蒸压温度为170 ℃时制得的蒸压砖抗压强度为基准，蒸压温度升至180 ℃、190 ℃时，抗压强度提升5.66%、7.95%。考虑经济效益与蒸压砖质量，蒸压温度选用180 ℃，抗压强度为21.67 MPa。

蒸压养护阶段，提高恒温温度有利于加快沙漠砂蒸压砖中 SiO_2 和 $Ca(OH)_2$ 的反应速率，增加系统中水化产物的数量，改变砖体微观形貌。本节通过SEM对不同蒸压温度下沙漠砂蒸压砖微观形貌变化情况进行观察，结果如图9所示。

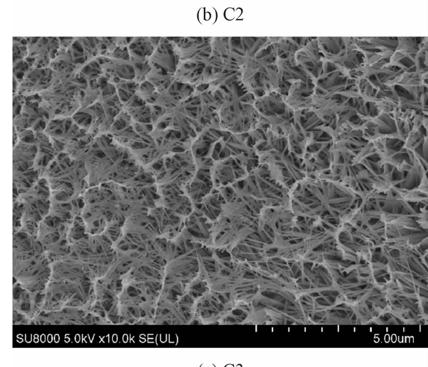
由图9可知，不同的蒸压温度条件下沙漠砂蒸压砖微观形貌不同。蒸压温度为170 ℃时，沙漠砂蒸压砖内部生成了一些絮状的水化产物，与沙漠砂及骨料连接较弱，蒸压砖强度较低；蒸压温度升至180 ℃时，沙漠砂及骨料表面被水化产物附着，水化产物之间互相搭接，形成网状结构，将沙漠砂及骨料连接，沙漠砂蒸压蒸压砖的强度有所提升。当蒸压温度达到190 ℃时，沙漠砂蒸压砖内部水化产物大面积均匀覆盖沙漠砂及骨料，砖体强度达到试验的最大值。



(a) C1



(b) C2



(c) C3

图9 不同蒸压温度沙漠砂蒸压砖的SEM图

Fig.9 SEM images of desert sand autoclaved bricks at different autoclaved temperatures

对不同蒸压温度下的沙漠砂蒸压砖进行 XRD 分析,图谱见图 10。

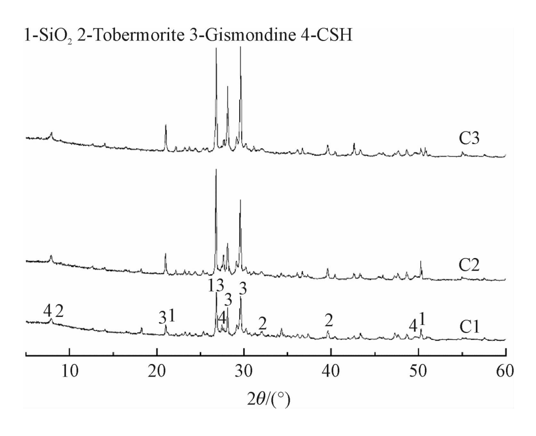


图 10　不同蒸压温度沙漠砂蒸压砖的 XRD 图谱

Fig. 10　XRD patterns of desert sand autoclaved bricks at different autoclaved temperatures

由图 10 可知,不同蒸压温度条件下蒸压砖水化产物衍射峰强度有所变化。蒸压温度为 170 ℃时,水化产物托勃莫来石、水钙沸石、C-S-H 的衍射峰较低,水化产物少;蒸压温度升至180 ℃时,托勃莫来石、水钙沸石衍射峰升高,水化产物生长延伸互相搭接,形成网状结构,提高砖体强度;蒸压温度由 180 ℃升至 190 ℃时,托勃莫来石、C-S-H 的衍射峰强度变化较小,水钙沸石的衍射峰明显升高,表明蒸压温度为 180 ℃时,沙漠砂蒸压砖内部的水化反应已基本达到生成 C-S-H 最佳状态,继续升温会使主要提供蒸压砖强度的水化产物 C-S-H 部分转变为水钙沸石,对砖体强度提高不大。

3　结　论

针对沙漠砂在蒸压砖中的应用问题,本研究以粉煤灰蒸压砖物料配合比为基础,以沙漠砂为原料制备蒸压砖,对沙漠砂蒸压砖的成型工艺和蒸压工艺进行了优化研究,得到合适的成型工艺和蒸压工艺,解释了蒸压砖强度形成机理,为制备 MU15 等级的沙漠砂蒸压砖提供技术支持及理论依据,得出以下的结论。

1)综合考虑经济与效益,制备 MU15 级沙漠砂蒸压砖宜采用的成型工艺和蒸压工艺为成型压力 20 MPa,蒸压时间 8 h,蒸压温度 180 ℃。

2)合适的成型压力会增大物料之间接触面积,加快物理化学反应;过高成型压力不利于砖体内部空气排出,残余空气被压缩形成空气垫层不利于坯体成型和力学性能。

3)随着蒸压温度的升高和蒸压时间的延长,水化产物水化硅酸钙(C-S-H)会逐渐形成互相连锁的网状构造,连接沙漠砂及骨料,填补蒸压砖内部的孔隙,显著提高抗压强度;当蒸压温度过高或者蒸压时间过长,四配位 Al[4]进入 C-S-H 的数量增多,导致水钙沸石衍射峰明显升高,抗压强度增长不明显,因此蒸压制度的确立应在保证水化产物多样性的基础上,保证 C-S-H 结构不发生转变。

参考文献:

[1]　ZHANG L Y. Production of bricks from waste materials — a review [J]. Construction and building materials,2013,47:643-655.

[2]　KOSTRZEWA-DEMCZUK P,STEPIEN A,DACHOWSKI R,et al. The use of basalt powder in autoclaved brick as a method of production waste management[J]. Journal of cleaner production,2021,320:128900.

[3]　KOMISARCZYK K,DACHOWSKI R. A study of selected properties of autoclaved bricks[C]//3rd Scientific Conference Environmental Challenges in Civil Engineering (ECCE 2018). Les Ulis,France:EDP Sciences,2018:02017.

[4]　齐仕杰. 利用废弃混凝土和废弃粘土砖制备蒸压砖[D]. 大连:大连理工大学,2021.

[5]　丁亚九. 多晶硅废渣蒸压砖的制备及其性能研究[D]. 南京:东南大学,2016.

[6]　李玲,焦向科,彭如振. 稀土尾矿蒸压砖的制备及强度性能研究[J]. 非金属矿,2019,42(3):28-31.
LI Ling,JIAO Xiangke,PENG Ruzhen. Preparation and strength performance of rare earth tailing based autoclaved bricks[J]. Nonmetallic mines,2019,42(3):28-31(in Chinese).

[7]　李鹏冠,赵风清. 钢渣-尾矿蒸压砖的生产工艺参数研究[J]. 环境科学与技术,2016,39(4):102-106.
LI Pengguan,ZHAO Fengqing. Factors on autoclaved brick from polyphosphate modified steel slag and tailings[J]. Environmental science & technology,2016,39(4):102-106(in Chinese).

[8]　孙福凯. 低品质粉煤灰制备蒸压砌块研究[D]. 济南:山东建筑大学,2020.

[9]　赵云良,张一敏,陈铁军. 采用低硅赤铁矿尾矿制备蒸压砖[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(5):1760-1765.
ZHAO Yunliang,ZHANG Yimin,CHEN Tiejun. Preparation of autoclaved bricks made from low-silicon hematite tailings[J]. Journal of Central South University (science and technology),2013,44(5):1760-1765(in Chinese).

[10]　于元峰,张喜发,矫清先,等. 塔克拉玛干沙漠砂工程性质试验研究[J]. 中国沙漠,2007,27(3):362-366.

YU Yuanfeng, ZHANG Xifa, JIAO Qingxian, et al. Research on engineering properties of desert sands in Taklimakan desert[J]. Journal of desert research, 2007, 27(3): 362-366(in Chinese).

[11] 杨小荟，王玉宝，崔东，等. 古尔班通古特沙漠砂的物理力学性质[J]. 中国沙漠，2005，25(4)：563-569.

YANG Xiaohui, WANG Yubao, CUI Dong, et al. Physical and mechanical characters of sands in Gurbantonggut desert[J]. Journal of desert research, 2005, 25(4): 563-569(in Chinese).

[12] YAN W L, WU G, DONG Z Q. Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model[J]. Construction and building materials, 2019, 226: 469-482.

[13] 马菊荣，刘海峰，杨维武. 沙漠砂混凝土动态力学性能实验研究[J]. 实验力学，2015，30(4)：491-498.

MA Jurong, LIU Haifeng, YANG Weiwu. Experimental study of dynamic mechanical properties of desert sand concrete[J]. Journal of experimental mechanics, 2015, 30(4): 491-498(in Chinese).

[14] 中华人民共和国工业和信息化部. 硅酸盐建筑制品用生石灰：JC/T 621—2009[S]. 北京：中国建材工业出版社.

[15] CICEK T, TANRIVERDI M. Lime based steam autoclaved fly ash bricks[J]. Construction and building materials, 2007, 21(6): 1295-1300.

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 砌墙砖试验方法：GB/T 2542—2012[S]. 北京：中国标准出版社，2012.

[17] 赵云良. 低硅铁尾矿制备蒸压砖技术及机理研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2012.

[18] 蔡礼雄. 轻质高强节能砌块的制备与性能影响研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2014.

[19] 赵子远，胡晨光，白瑞英，等. 蒸养和蒸压条件下粉煤灰水泥浆体中铝配位分布规律[J]. 功能材料，2018，49(5)：5096-5102.

ZHAO Ziyuan, HU Chenguang, BAI Ruiying, et al. Distribution of aluminum ions coordination in Portland cement pastes with fly ash at steam-cured and autoclaved condition[J]. Journal of functional materials, 2018, 49(5): 5096-5102(in Chinese).

（编辑　张璐）

